

турбулизацию потока в каждом домене, а не только на входе как это делает ANSYS.

Это находит свое подтверждение в статье John D Denton [3], где говорится о том, что в расчетной модели КС при интенсивности турбулентности 2% нет перемешивания в середине потока, а при введении дополнительной турбулизации 6% оно есть, что соответствует действительности.

Данные вариации могут возникнуть при продувке компрессора (любой лопаточной машины), их стоит принимать во внимание, так как они показывают варианты течения потока, нужно учиться задавать такую расчетную модель, которая будет давать результаты максимально близкие к экспериментальным.

#### Список литературы:

1. Инженерно-технический журнал «ANSYS Advantage. Русская редакция» издается с октября 2005 г. компанией ЗАО «КАДФЕМ Си-Ай-Эс» и является официальным печатным изданием компании ANSYS, Inc. [Электронный ресурс]
2. Пугачев П.В. Расчет и проектирование лопастных гидромашин. Расчет вязкого течения в лопастных гидромашинах с использованием пакета ANSYS CFX : учеб. пособие / П.В. Пугачев, Д.Г. Свобода, А.А. Жарковский. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. -120 с.
3. SOME LIMITATIONS OF TURBOMACHINERY CFD, John D Denton, Whittle Laboratory Cambridge, UK /Proceedings of the ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea and Air June 14-18, 2010, Glasgow, UK.

## ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОЛЬФРАМА В РАСПЛАВАХ ХЛОРИДОВ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ

*Рыжов А.А., Иванов А. Б., Волкович В. А.*

Уральский федеральный университет г. Екатеринбург, Россия

[a.a.ryzhov@urfu.ru](mailto:a.a.ryzhov@urfu.ru)

**Аннотация.** Методами высокотемпературной электрохимии и спектроскопии исследовано анодное растворение металлического вольфрама в расплавах эвтектических смесей  $3\text{LiCl}-2\text{KCl}$  (723–1023 К) и  $\text{NaCl}-2\text{CsCl}$  (823–

1023 K). Показано, что в расплав переходят ионы W(IV). Определены условные стандартные электродные потенциалы вольфрама.

**Ключевые слова:** вольфрам, хлоридный расплав, электродный потенциал

## TUNGSTEN ELECTROCHEMICAL PROPERTIES IN ALKALI A.

Ryzhov A., Ivanov A., Volkovich V.

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

**Abstract.** Anodic dissolution of tungsten investigated by high-temperature electrochemical and spectroscopy methods in melts based on eutectic mixtures 3LiCl–2KCl (723–1023 K) and NaCl–2CsCl (823–1023 K). Showed that ions W(IV) were formed and present in the equilibrium with tungsten metal. Formal standard W/W(IV) electrode potentials were determined.

**Key words:** tungsten, chloride melt, electrode potential

Жидкосольевой ядерный реактор с топливом в виде фторидного или хлоридного расплава рассматривается в качестве одного из перспективных типов ядерных энергетических установок (ЯЭУ). Подбор конструкционных материалов, обладающих достаточной коррозионной стойкостью, является одной из причин, сдерживающих внедрение данного типа ЯЭУ. Металлический вольфрам или покрытия на его основе являются одними из возможных конструкционных материалов. Расплавы хлоридов щелочных металлов могут быть использованы для электролитического осаждения вольфрама. Для оптимизации технологического процесса необходимы данные об электрохимических свойствах вольфрама в хлоридных расплавах, в том числе об электродных потенциалах.

Имеющиеся в литературе сведения об электрохимических свойствах вольфрама в высокотемпературных галоидных расплавах ограничены и зачастую противоречивы. Это связано, с экспериментальными трудностями, вызванными высоким сродством хлоридов вольфрама к кислороду; следовые количества которого приводят к образованию оксихлоридных соединений [1].

В работе [2] было показано, что в расплаве KCl–KF в равновесии с металлическим вольфрамом находятся ионы W(V) и W(VI), были получены температурные зависимости условных стандартных электродных потенциалов  $E^*W(VI)/W$  и  $E^*W(V)/W$  в интервале 923–1123 K. В результате анализа изотерм

электродных потенциалов вольфрама в расплаве NaCl–KCl был сделан вывод о присутствии в равновесии с металлом ионов W(IV) и W(V) [3, 4]. Электродные потенциалы вольфрама также были измерены в расплавах NaCl–2CsCl и NaCl–KCl–CsCl [5]. Однако во всех указанных работах контроль содержания кислорода в атмосфере не осуществлялся. Целью настоящей работы являлось определение электродных потенциалов вольфрама в хлоридных расплавах щелочных металлов в условиях, позволяющих максимально исключить влияние кислорода на результаты измерений.

### **Экспериментальная часть**

Эксперименты выполняли в расплавах на основе эвтектических смесей 3LiCl–2KCl и NaCl–2CsCl. Ионы вольфрама в расплав вводили анодным растворением металла (анодная плотность тока 0.05–0.1 А/см<sup>2</sup>) непосредственно перед проведением потенциометрических измерений. В качестве катода при анодном растворении использовали свинцовый электрод. Эксперименты проводили в аргоновом перчаточном боксе, оборудованном высокотемпературными оптическими печами. Содержание влаги и кислорода в атмосфере не превышало 10–5 и 10–4 %, соответственно. При проведении электрохимических измерений в качестве электрода сравнения использовали хлоридсеребряный электрод, состоявший из серебряной проволоки, погруженной в расплав соли-растворителя, содержащий 1 мол. % AgCl. Концентрацию вольфрама в замороженных электролитах определяли с помощью масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой.

### **Результаты и их обсуждение**

Для определения средней степени окисления ионов вольфрама, присутствующих в равновесии с металлом, был исследован процесс анодного растворения металлического вольфрама.

Число электронов, принимающих участие в анодном процессе, рассчитывали по убыли массы анода и количеству пропущенного электричества. Оксидиметрией электролитов определяли среднюю степень окисления вольфрама. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты определения степени окисления ионов вольфрама, образующихся при анодном растворении металла в расплавах хлоридов щелочных металлов

<i>T</i> , К	<i>Q</i> , Кл	Убыль массы анода, г	Средняя степень окисления вольфрама	
			по убыли массы	оксидиметрический анализ

Расплав 3LiCl–2KCl				
823	72	0.0358	3.84	4.08
1023	180	0.0851	4.03	4.08
1123	144	0.0694	3.95	3.76
Расплав NaCl–2CsCl				
823	360	0.1860	3.69	3.88
923	360	0.1828	3.75	3.73
1023	360	0.1911	3.59	3.96
1123	360	0.1949	3.52	4.25
1123	360	0.2044	3.36	4.23

При использованных в работе плотностях анодного тока, растворение вольфрама протекает по четырехэлектронной схеме и средняя степень окисления ионов вольфрама в расплаве также близка к четырем. В качестве дополнительного метода исследования, в процессе анодного растворения металла проводили регистрацию электронных спектров поглощения (ЭСП) расплавов. Пример ЭСП представлен на рис. 1.

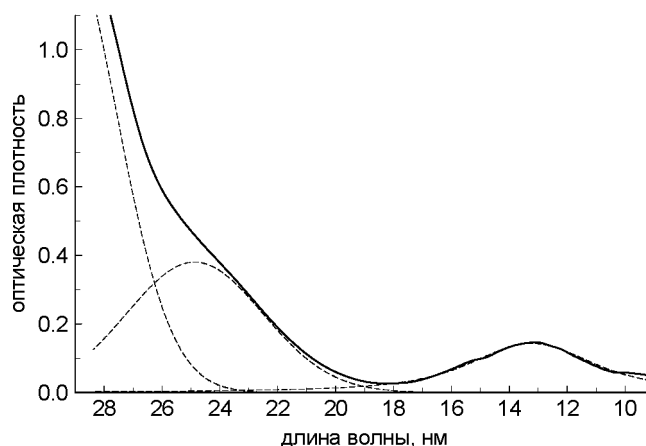


Рисунок 1 – ЭСП продуктов анодного растворения вольфрама в расплаве NaCl–2CsCl, разложенный на индивидуальные компоненты.

Разложение ЭСП на индивидуальные компоненты позволило выявить полосы, соответствующие электронным переходам, ожидаемым для октаэдрическикоординированного комплексного иона вольфрама(IV) – два спинразрешенных  $^3T_{1g} \rightarrow ^3T_{2g}$  и  $^3T_{1g} \rightarrow ^3T_{1g}(P)$  перехода с максимумами около 13000 и 24500  $\text{см}^{-1}$ , соответственно. Так, результаты спектроскопических измерений подтверждают, что в процессе анодного растворения вольфрама в расплав переходят в основном ионы W(IV), образующие комплексные ионы  $\text{WCl}_6^{2-}$ .

По результатам потенциометрических измерений были определены электродные и рассчитаны условные стандартные электродные потенциалы вольфрама. Полученные результаты представлены на рис. 2.

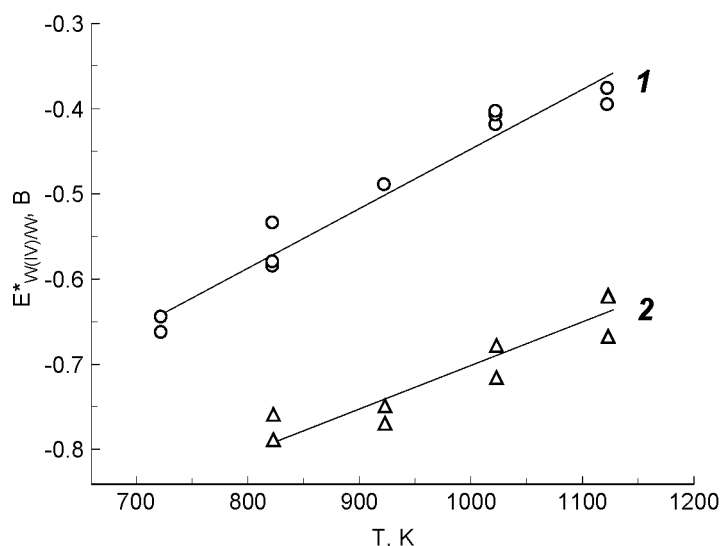


Рисунок 2 – Температурные зависимости условного стандартного электродного потенциала вольфрама в расплавах на основе эвтектических смесей 3LiCl–2KCl (1) и NaCl–2CsCl (2).

Температурные зависимости  $E^*_{W(IV)/W}$  (относительно хлорного электрода сравнения) удовлетворительно описываются следующими уравнениями:

3LiCl–2KCl, 723–1123 K

$$E^* = -1.147 + 7.01 \cdot 10^{-4} \cdot T (\pm 0.04 \text{ В}) \quad (1)$$

NaCl–2CsCl, 823–1123 K

$$E^* = -1.189 + 4.87 \cdot 10^{-4} \cdot T (\pm 0.04 \text{ В}) \quad (2)$$

На основании электрохимических измерений было рассчитано изменение свободной энергии Гиббса образования тетрахлорида вольфрама в соответствующих солях-растворителях и получены следующие уравнения температурных зависимостей:

$$\Delta G^*_{WCl_4} = -442.8 + 0.271 \cdot T, \text{ кДж/моль (3LiCl–2KCl)} \quad (3)$$

$$\Delta G^*_{WCl_4} = -458.9 + 0.188 \cdot T, \text{ кДж/моль (NaCl–2CsCl)} \quad (4)$$

Видно, что устойчивость комплексных ионов вольфрама в исследованных расплавах повышается с увеличением среднего радиуса катионов соли-растворителя, что является следствием уменьшения поляризующего воздействия со стороны катионов второй координационной сферы.

Процесс анодного растворения металлического вольфрама протекает по четырехэлектронной схеме. В равновесии с металлом в расплаве находятся ионы вольфрама(IV). Рассчитаны условные стандартные электродные потенциалы вольфрама и термодинамические характеристики комплексных ионов вольфрама в расплавах. Устойчивость ионов  $WCl_6^{2-}$  увеличивается с увеличением среднего радиуса катионов соли-растворителя.

### Список литературы

1. D. A. Danilov, V. A. Volkovich, B. D. Vasin, I. B. Polovov, T. R. Griffiths, “Tungsten chemistry in alkali chloride melts”, Z. Naturforsch., 2007, 62a, (12), 739–744.
2. А. М. Виноградов, А. В. Волкович, А. М. Жбанов, Б. Ф. Ковалев, С. К. Цыпленков, «Равновесные потенциалы вольфрама в расплаве KCl–KF–WCl<sub>6</sub>», Изв. вузов. Цвет. металлургия, 1981, № 5, 71–74.
3. С. Н. Школьников, М. И. Манненков, А. К. Ярмолович, «Равновесные потенциалы вольфрама в расплаве хлоридов калия и натрия», ЖПХ, 1973, 46, № 9, 1918–1921.
4. М. И. Манненков, С. Н. Школьников, «Анодное растворение вольфрама в хлоридных и хлоридно-фторидных расплавах», Изв. вузов. Цвет. металлургия, 1974, № 1, 65–68.
5. A. B. Ivanov, V. A. Volkovich, D. A. Poskryakov, B. D. Vasin, T. R. Griffiths, “Electrode potentials of tungsten in fused alkali chlorides”, AIP Conference Proceedings, 2016, 1767, 020010 (1–6).

## АНАЛИЗ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ 4А С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ КЛАСТЕРИЗАЦИИ

*Савкин К.В., Шаманин Д.П.*

Уральский федеральный университет г. Екатеринбург, Россия

[savkinkostya@mail.ru](mailto:savkinkostya@mail.ru)

**Аннотация.** В данной статье предложен вариант разбития двигателей серии 4А на кластеры с помощью алгоритма k-means(k -средних). Проведен анализ переходных процессов в контуре тока для двигателей, находящихся в одном кластере, при настройке регулятора тока на центр кластера.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель; кластеризация; метод k-средних; электропривод; моделирование; переходные процессы.